

УДК 624.046.5

С.Ф.ПІЧУГІН, д-р техн. наук, А.В.МАХІНЬКО, канд. техн. наук
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ ГРАТЧАСТИХ БАШТОВИХ ОПОР ЗВ'ЯЗКУ ЯК СКЛАДНИХ СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ

Розглядаються деякі підходи до розрахунку надійності сталевих гратчастих опор як складних стержневих систем. Виконано оцінку надійності просторових секцій трикутного й чотирикутного перерізу з різними типами решітки, наведено формули ймовірностей безвідмовної роботи просторових секцій у випадку рівнонадійності їх елементів. Аналізуються залежності ймовірності безвідмовної роботи башт у цілому від надійності окремих секцій у припущенні незалежності їх відмов.

Сталева гратчаста башта представляє собою складну стержневу систему, надійність якої визначається низкою факторів детерміновано-го і випадкового характеру. До детермінованих факторів можна віднести конструктивну схему башти і характер взаємодії її окремих елементів. Випадкові фактори відображаються на показниках надійності башти через випадковість зовнішніх навантажень, стохастичність міцнісних характеристик матеріалу і відхилення реальних умов роботи її елементів від прийнятої розрахункової схеми. Відповідно до цього, можна вважати, що конструктивна схема баштової опори являє собою деяку передаточну функцію між надійністю окремих елементів і надійністю опори в цілому.

Питанням надійності елементів металоконструкцій, завантажених випадковим вітровим навантаженням, присвячено багато робіт, серед яких можна назвати роботи [2, 5-8]. Математичний апарат, наведений у згаданих роботах, є досить простим і легко може бути застосований для побудови функцій надійності окремих стержнів башти. Питання структурної надійності сталевих конструкцій досить рідко можна зустріти у бібліографічних джерелах [3], хоча розуміння того факту, що структурний аналіз конструкцій (зокрема, баштових опор) обов'язково повинен бути присутнім в ймовірнісному розрахунку, можна зустріти в роботах [4, 9].

У даній статті запропоновано один із можливих методів побудови функцій надійності баштових опор. Представлений метод є одним з найпростіших і не стосується питань живучості опор, хоча у деякій мірі розглядає вплив резервування елементів на загальну оцінку показників надійності. Також зазначимо, що досвід розробки сталевих конструкцій свідчить, що чим простіша конструкція, її виготовлення, монтаж і експлуатація, тим вона надійніша. Відсутність зайвих елементів у конструкції зменшує ймовірність появи відмов. Однак визначи-

ти необхідний і достатній об'єм елементів конструкцій можна тільки в результаті порівняльного аналізу декількох варіантів схеми конструкції. Це твердження справедливе не тільки для всієї споруди загалом, але і для окремих її частин. У даній роботі для підтвердження висловлених зауважень були розглянуті типові секції трьохгранних і чотиригранних баштових опор зв'язку.

Для визначення надійності баштової опори необхідно знати ймовірність безвідмовної роботи кожного її несучого елемента і вміти скласти з них структурну модель надійності башти в цілому. Така модель повинна враховувати взаємозв'язки між елементами при їх відмові. Ці взаємозв'язки виявляються за допомогою відповідних розрахунків на міцність і стійкість з метою перевірки несучої здатності після відмови. Якщо баштова споруда зберігає свою несучу здатність після відмови якого-небудь несучого елемента, то такі елементи називатимемо, за аналогією із загальною теорією надійності, резервними. Цю ж аналогію будемо використовувати для побудови структурної моделі надійності баштових опор.

Башту умовно розіб'ємо на три ієрархічні частини: стержень, секція і башта в цілому (рис.1). Тоді процедура оцінки надійності башти також наслідуватиме дану ієрархічну структуру. Функцію надійності окремого стержня позначимо через $P_{b,i}(t)$, при цьому функцію надійності пояса позначимо через $P_{n,i}(t)$, розпірки $P_{pn,i}(t)$, а розкоси $P_{p,i}(t)$; функція надійності просторової секції – $P_{sec,i}(t)$ і функція надійності башти – $P(t)$.

Взаємозв'язок зазначених функцій, у припущенні незалежності відмов просторових секцій, запишемо у вигляді:

$$P(t) = \prod_i^N P_{sec,i}[t | P_{n,i}(t), P_{pn,i}(t), P_{p,i}(t)], \quad (1)$$

де N – кількість секцій баштової опори.

Під секцією будемо розуміти просторову конструкцію, утворену поясами, розкосами і (або) розпірками між точками розкріплення поясів башти (рис.1). Таким чином, надійність башти в цілому залежатиме від надійності окремої секції: чим більше секцій матиме башта, тим надійність її буде меншою при незмінній надійності окремих секцій. Сказане зауваження ілюструють графіки рис.2, побудовані у логарифмічних координатах.

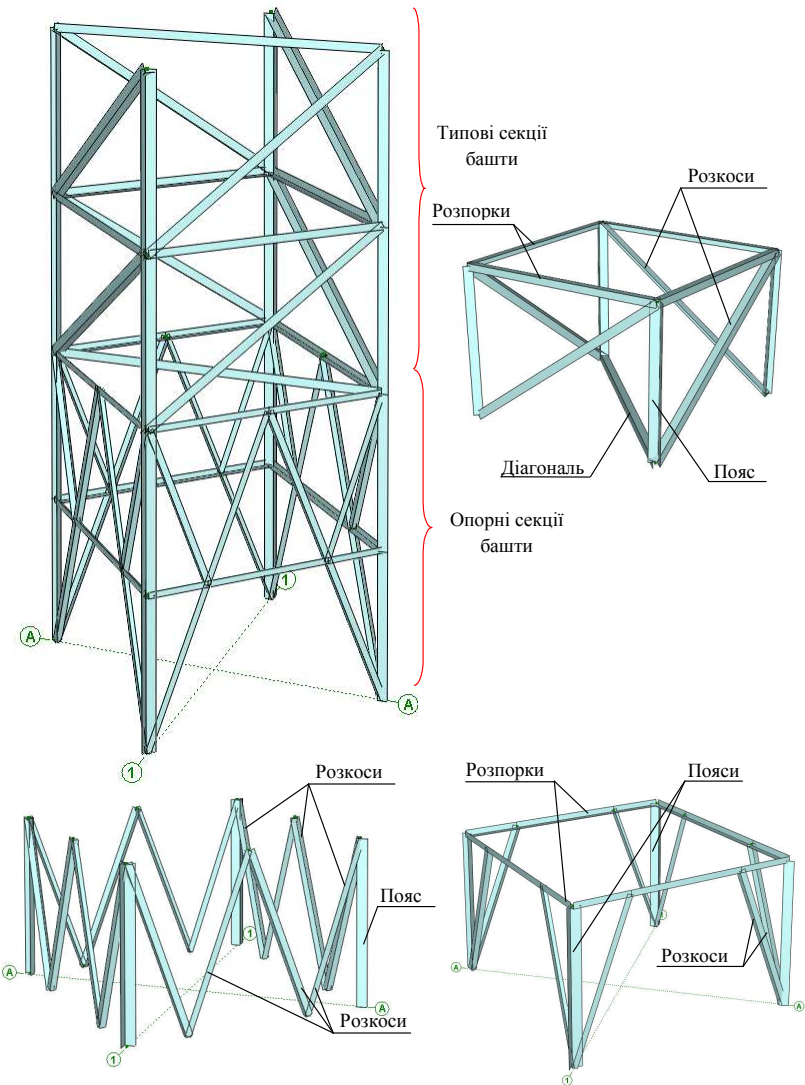


Рис.1 – Секції чотиригранної башти

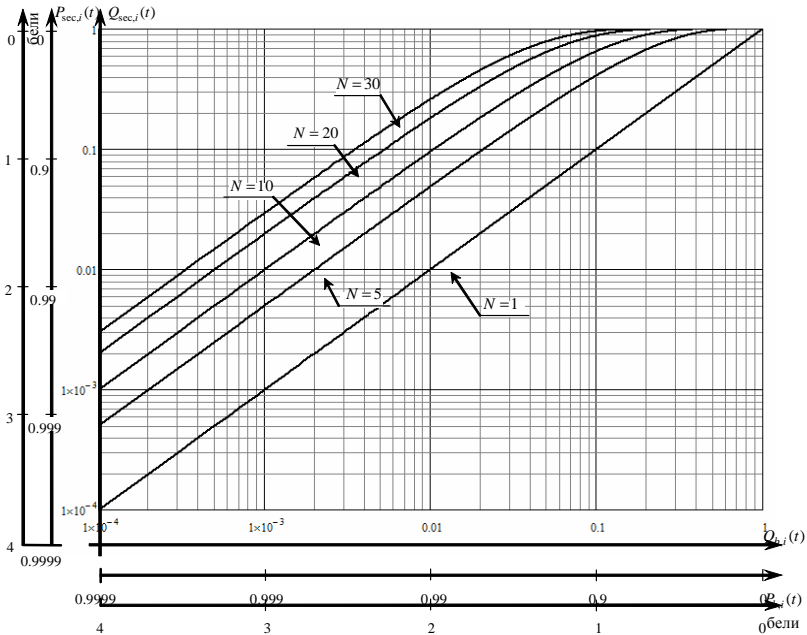


Рис.2 – Залежності ймовірності відмов башти від ймовірності відмов окремих секцій

Функція надійності $P_{\text{sec},i}(t)$ секцій башти залежатиме від конструктивного вирішення останніх та інтерпретування умови їх відмови. Зважаючи на це, розглянемо процедуру отримання функції $P_{\text{sec},i}(t)$ для більшості найпоширеніших просторових стрижневих секцій башт, при умові, що відмова секції буде інтерпретуватися, як відмова будь якого її стержня. При цьому, будемо брати до уваги ту обставину, що надійність роботи однакових за призначенням стержнів рівні між собою (це твердження ми робимо на підставі гіпотези про рівномірність вітрів різного напрямку).

1. *Секція трикутного перерізу з перехресною решіткою.* Дана секція складається з трьох поясів і шести розкосів (рис.3, а). Всі елементи однаково можуть сприймати, як зусилля стиску, так і зусилля розтягу. При руйнуванні одного із стержнів секції її геометрична незмінність порушується, що призводить до відмови секції загалом. Руйнування кожного стержня будемо вважати незалежним випадком. У такому разі ймовірність безвідмовної роботи такої секції $P_{\text{sec},i}(t)$ можна

виразити на основі теореми перемноження ймовірностей за формулою

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^3(t)P_{p,i}^6(t). \quad (2)$$

2. Секція трикутного перерізу з розкідною решіткою. Ця секція складається з трьох поясів, трьох розпірок і трьох розкосів. Імовірність безвідмовної роботи цієї секції (рис.3, б) можна отримати за аналогією з формулою (2), в якій замість трьох розкосів вводиться три розпірки:

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^3(t)P_{p,i}^3(t)P_{pn,i}^3(t). \quad (3)$$

3. Секція трикутного перерізу з гнучкими хрестовими в'язями. Для цієї секції характерна наявність трьох поясів і розпірок та шести розкосів. Робота даної секції (рис.3, в) відрізняється від роботи інших типів, що перехресна решітка секції працює тільки на розтяг і не може сприймати жодного зусилля стиску. Застосовуючи теорему множення ймовірностей, маємо:

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^3(t)P_{p,i}^6(t)P_{pn,i}^3(t). \quad (4)$$

4. Секція трикутного перерізу з жорсткими хрестовими в'язями. Секція, що розглядається, як і попередня, має три пояси, три розпірки та шість розкосів. Специфіка роботи даної секції (рис.3, г) характеризується тим, що всі елементи можуть сприймати як зусилля стиску, так і розтягу. При видаленні одного з розкосів у кожній грані секція зберігає свою геометричну незмінність. Це вказує на те, що всі шість розкосів секції є резервними. Імовірність безвідмовної роботи секції з трьома парами резервних розкосів виражається формулою

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^3(t)P_{pn,i}^3(t)\{1 - [1 - P_{p,i}(t)]^2\}^3. \quad (5)$$

5. Секція чотирикутного перерізу з перехресною решіткою. Ця секція складається з чотирьох поясів, восьми розкосів – по два перехресних розкоса у кожній грані і діагональної розпірки (рис.4, а). Всі елементи можуть сприймати як зусилля розтягу, так і зусилля стиску. У такій секції два пояси, що проходять через вузли, до яких кріпляться і стержень діагональної розпірки, можуть бути видаленими без порушення несучої здатності секції. Звідси імовірність безвідмовної роботи секції виражається як

$$P_{\text{sec},i}(t) = \{1 - [1 - P_{n,i}^2(t)]^2\}P_{p,i}^8(t) = P_{n,i}^2(t)P_{p,i}^8(t)[2 - P_{n,i}^2(t)]. \quad (6)$$

Тут і далі приймається, що діагональна розпірка є абсолютно надійним елементом секції, тобто $P_{o,i}(t) = 1$. Таке припущення є цілком виправданим з огляду на те, що зусилля в таких елементах є майже нульовими.

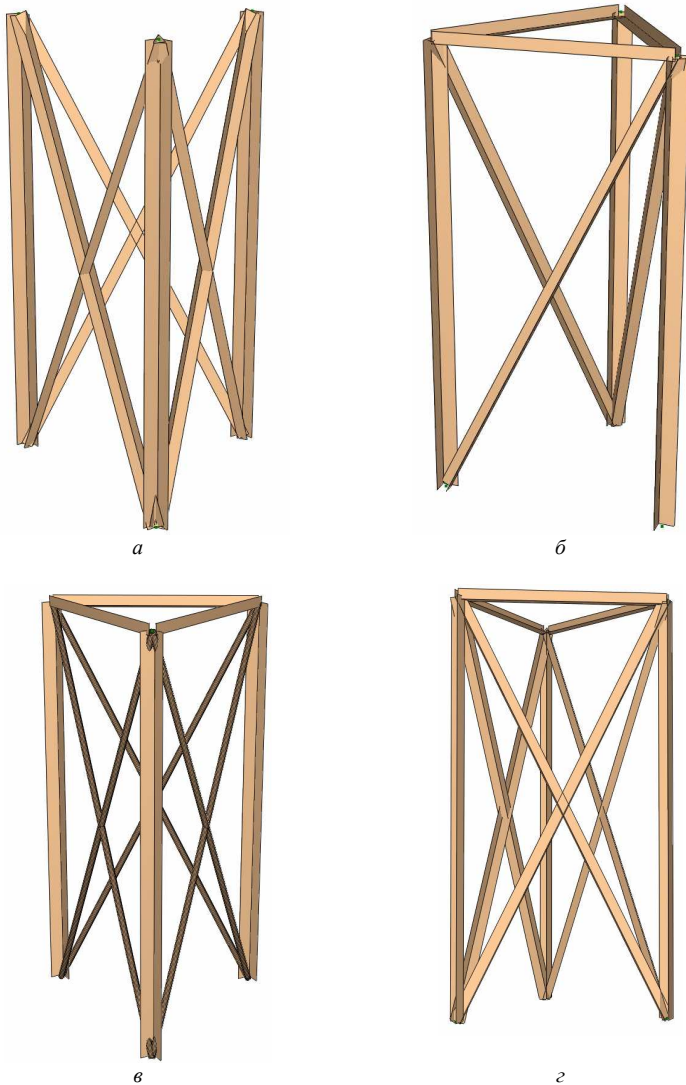


Рис.3 – Типы пространственных секций баштовых опор треугольного перерізу
a – з перехресною решіткою; *б* – з розкісною решіткою;
в – з хрестовими гнучкими в'язями; *г* – з жорсткими хрестовими в'язями.

6. Секція чотириохкутного перерізу з розкісною решіткою. В такій секції (рис.4, б), яка складається з чотирьох поясів, чотирьох розпірок, чотирьох розкосів і діагональної розпірки також є резервування: можна прибрати один з поясів, і геометрична незмінність секції не порушиться. Відповідно, у такій секції резервними стержнями будуть два діаметрально протилежних пояси, і тільки після руйнування обох поясів секція перейде у стан відмови. Функція надійності такої секції записується у вигляді:

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^2(t) \{1 - [1 - P_{n,i}(t)]^2\} P_{p,i}^4(t) P_{pn,i}^4(t) = P_{n,i}^3(t) P_{p,i}^4(t) P_{pn,i}^4(t) [2 - P_{n,i}(t)]. \quad (7)$$

7. Секція чотириохкутного перерізу з гнучкими хрестовими в'язями. Секція з хрестовими в'язями (рис.4, в), які працюють тільки на розтяг, не має жодного резервного стержня. Беручи до уваги, що секція складається з чотирьох поясів, чотирьох розпірок і восьми розкосів, маємо формулу імовірності безвідмовної роботи у вигляді:

$$P_{\text{sec},i}(t) = P_{n,i}^4(t) P_{p,i}^8(t) P_{pn,i}^4(t). \quad (8)$$

8. Секція чотириохкутного перерізу з жорсткими хрестовими в'язями. Секція з жорсткими хрестовими розкосами (рис.4, г), які працюють і на стиск, і на розтяг, буде мати резервними всі стержні розкосів і два стержня поясів. Формула імовірності безвідмовної роботи такої секції виражається формулою

$$\begin{aligned} P_{\text{sec},i}(t) &= P_{n,i}^2(t) \{1 - [1 - P_{n,i}(t)]^2\} \{1 - [1 - P_{p,i}(t)]^2\}^4 P_{pn,i}^4(t) = \\ &= P_{n,i}^3(t) P_{pn,i}^4(t) P_{p,i}^4(t) [2 - P_{n,i}(t)] [2 - P_{p,i}(t)]^4. \end{aligned} \quad (9)$$

На основі отриманих залежностей можна виконати порівняльний аналіз надійності різних видів секцій за умови, що відомі величини імовірності безвідмовної роботи окремих стержнів. На першому етапі порівняльної оцінки вважатимемо, що імовірності безвідмовної роботи всіх стержнів секції однакові і становлять p , відповідно імовірність відмови стержнів дорівнює $q = 1 - p$. Формули (2)-(9) у цьому випадку наберуть простішого вигляду (таблиця).

На основі формул цієї таблиці було побудовано графіки абсолютної (рис.5, а) та відносної (рис.5, б) надійності розглянутих вище секцій. Під графіками абсолютної надійності розуміється графік залежності $P_{\text{sec},i}(t) - p$, або $Q_{\text{sec},i}(t) - q$, а під графіками відносної надійності – графік залежності $Q_{\text{sec},i}(t) / Q_{\text{sec},\min}(t) - q$, де $Q_{\text{sec},\min}(t)$ – мінімальна імовірність відмови із всіх секцій, що залучаються до розгляду.

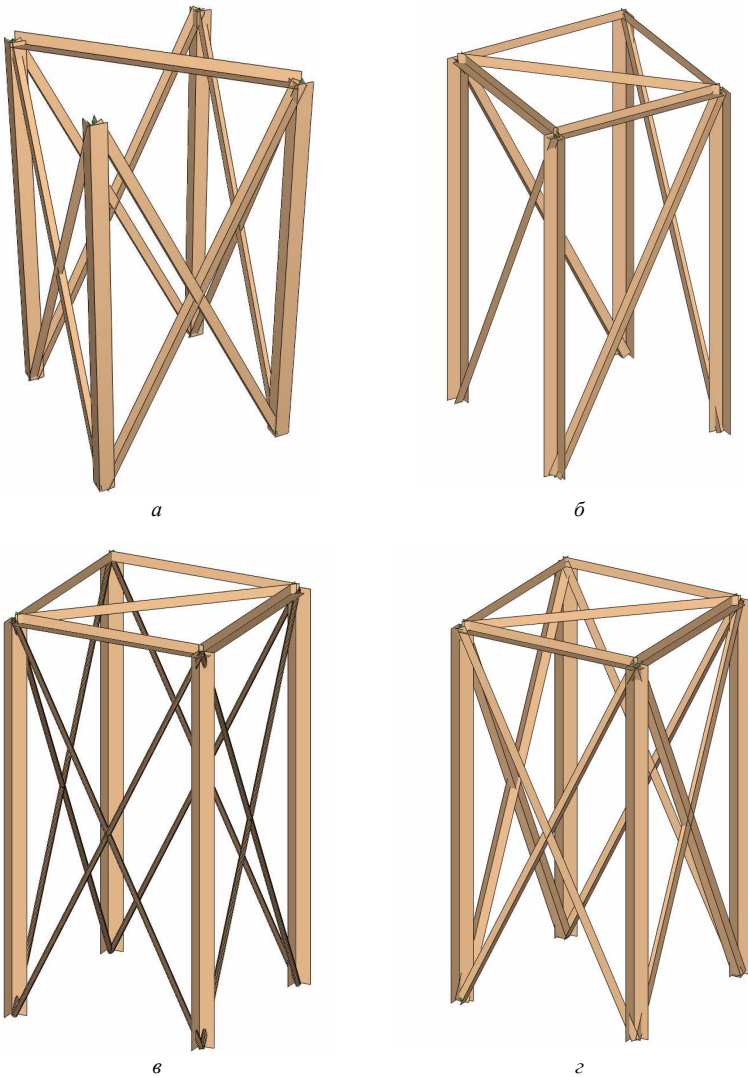


Рис.4 – Типи просторових секцій баштових опор квадратного перерізу
а – з перехресною решіткою; *б* – з розкідною решіткою;
в – з хрестовими гнучкими в'язями; *г* – з жорсткими хрестовими в'язями.

Формули імовірності безвідмовної роботи просторових секцій для випадку рівнонадійності елементів секцій

№ п/п	Трьохгранні секції	№ п/п	Чотирьохгранні секції
1	$P_{\text{sec},i}(t) = p^9$	5	$P_{\text{sec},i}(t) = p^{10}(2 - p^2)$
2	$P_{\text{sec},i}(t) = p^9$	6	$P_{\text{sec},i}(t) = p^{11}(2 - p)$
3	$P_{\text{sec},i}(t) = p^{12}$	7	$P_{\text{sec},i}(t) = p^{16}$
4	$P_{\text{sec},i}(t) = p^9(2 - p)^3$	8	$P_{\text{sec},i}(t) = p^{11}(2 - p)^5$

Отримані результати дозволяють зробити деякі висновки про порівняльну надійність описаних вище секцій. Найбільшу надійність серед розглянутих секцій має трьохгранна секція з жорсткими хрестовими в'язями, тобто $Q_{\text{sec},\min}(t) = p^9(2 - p)^3$, а найменшу – чотирьохгранна секція з гнучкими хрестовими в'язями, працюючих тільки на розтяг. При цьому секції з хрестовою решіткою і жорсткими в'язями більш надійні, ніж з гнучкими, і більш надійні ніж розкісні решітки. Секції з жорсткими хрестовими в'язями квадратного перерізу у плані більш надійні, ніж трикутні, а секції з гнучкими хрестовими в'язями квадратного перерізу у плані менш надійні, ніж трикутного. Останню обставину можна пояснити тим, що секції з квадратним перерізом містять більшу кількість стержнів, ніж трикутні. При гнучких в'язях і в трикутній, і в квадратній секції руйнування будь-якого стержня порушує геометричну незмінність конструкції. Тому імовірність безвідмовної роботи таких конструкцій тим вище, чим менша кількість стержнів у конструкції. Звідси слідує, що трикутні башти з хрестовими гнучкими в'язями більш надійні, ніж квадратні башти з такою ж самою решіткою. При жорстких хрестових в'язях секції квадратного перерізу мають більшу кількість резервних стержнів, ніж трикутні. Тому внаслідок резервування загальна надійність квадратної у плані секції вище, ніж трикутної.

Характер залежностей (рис.5, б) показує, що при збільшенні надійності стержнів просторових секцій будь-яке відношення $Q_{\text{sec},i}(t)/Q_{\text{sec},\min}(t) - q$ прямує до сталої величини \aleph , яка для всіх розглянутих секцій дорівнює:

$$\aleph_{1/4} = \aleph_{2/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_1}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^9}{1 - p^9(2 - p)^3} \right] = \frac{3}{2}; \quad (10)$$

$$\aleph_{3/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_3}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^{12}}{1 - p^9 (2 - p)^3} \right] = 2; \quad (11)$$

$$\aleph_{5/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_5}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^{10} (2 - p^2)}{1 - p^9 (2 - p)^3} \right] = \frac{4}{3}; \quad (12)$$

$$\aleph_{6/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_6}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^{11} (2 - p)}{1 - p^9 (2 - p)^3} \right] = \frac{5}{3}; \quad (13)$$

$$\aleph_{7/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_7}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^{16}}{1 - p^9 (2 - p)^3} \right] = \frac{8}{3}; \quad (14)$$

$$\aleph_{8/4} = \lim_{p \rightarrow 1} \left(\frac{Q_8}{Q_4} \right) = \lim_{p \rightarrow 1} \left[\frac{1 - p^{11} (2 - p)^2}{1 - p^9 (2 - p)^3} \right] = \frac{3}{2}. \quad (15)$$

Графіки (рис.5, б) показують, у скільки разів імовірність відмови однієї секції більша, ніж за іншу при заданій величині відмови окремого стержня, а формули (10)-(15) дозволяють отримати величину, до якої прямує відношення ймовірностей відмов секцій при необмеженому зростанні імовірності безвідмовної роботи стержнів секцій. Ця обставина дозволяє сформулювати важливу лему: *для двох будь-яких просторових секцій різного конструктивного вирішення завжди існує таке значення імовірності безвідмовної роботи окремих стержнів, при збільшенні якого відношення ймовірностей відмов секцій змінюватись не буде, а дорівнюватиме сталій величині*. Дана лема є новою в теорії надійності конструкцій і для розглянутих секцій обґрунтовується формулами (10)-(15) і графіками (рис.5). Слід зазначити, що ця лема може бути розповсюджена й на баштову опору загалом, при цьому значення величин \aleph не зміняться і дорівнюватимуть значенням, знайдених за формулами (10)-(15) для окремих секцій.

Окреслені положення дозволяють вирішити і зворотну задачу надійності, коли проектувальнику при заданій імовірності безвідмовної роботи баштової опори необхідно знайти імовірність безвідмовної роботи стержнів. У такій постановці задачі висувається гіпотеза про рівнонадійність всіх секцій башти, яка повинна задовольняти умові

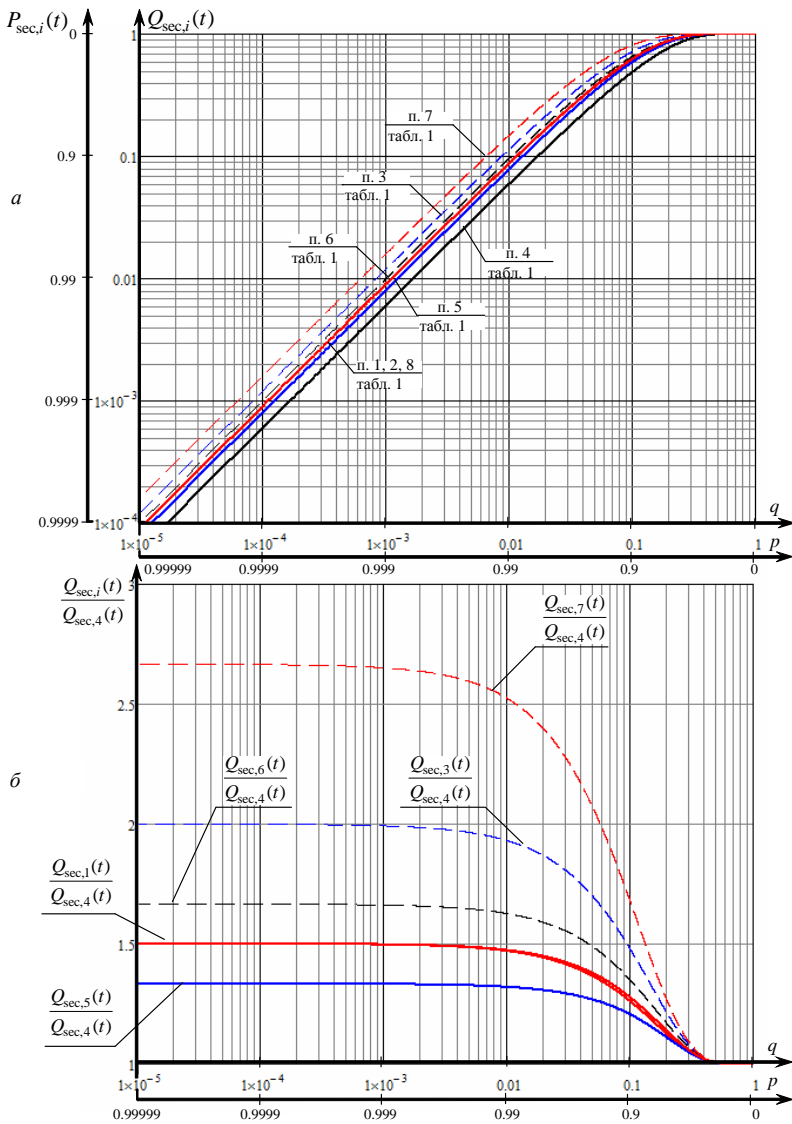


Рис.5 – Порівняльний аналіз надійності найпростіших стержневих секцій:
а – абсолютні функції надійності секцій; б – відносні функції надійності секцій.

$$[P_{\text{sec},i}] = \sqrt[n]{P(t = T_{ef})}. \quad (16)$$

Зворотний розв'язок наведених вище в таблиці рівнянь відносно P при $P_{\text{sec},i}(t) = [P_{\text{sec},i}(t)]$, у припущенні рівнонадійності всіх стержнів секцій, дозволить отримати нормативну надійність окремого стержня $[P_{b,i}]$. Графіки на рис.6 ілюструють окреслену процедуру на прикладі трьохгранних (рис.6, а) і чотиригранних (рис.6, б) опор при нормативній імовірності безвідмовної роботи останніх 0.9, 0.99 і 0.999. З графіків видно, що для забезпечення нормативної надійності башт, надійність окремих стержнів повинна бути на один, два (залежно від кількості секцій башти) порядки вище за надійність всієї башти. Хоча на практиці знайти розуміння цього факту, на жаль, практично неможливо.

Таким чином, було розроблено один із можливих алгоритмів оцінки надійності сталевих баштових опор. Функція надійності опори визначається за схемою послідовно з'єднаних незалежних елементів, у ролі яких виступають окремі секції баштової опори. Для трьохгранних і чотиригранних просторових секцій баштових опор з різною схемою решітки наведені формули функції надійності як функції ймовірностей безвідмовної роботи їх елементів. На основі порівняльного аналізу надійності просторових секцій показано, що найбільшу надійність має трьохгранна секція з жорсткими хрестовими в'язями, а найменшу – чотиригранна секція з гнучкими хрестовими в'язями. При цьому секції з хрестовою решіткою і жорсткими в'язями більш надійні, ніж з гнучкими, і більш надійні, ніж розкісні решітки. Секції з жорсткими хрестовими в'язями квадратного перерізу більш надійні, ніж трикутні, а секції з гнучкими хрестовими в'язями квадратного перерізу у плані менш надійні, ніж трикутного. На основі порівняльної оцінки надійності просторових секцій башт висловлена лема про те, що для двох будь-яких просторових секцій різного конструктивного вирішення завжди існує таке значення імовірності безвідмовної роботи окремих стержнів, при збільшенні якого відношення ймовірностей відмов секцій змінюватись не буде, а дорівнюватиме сталій величині.

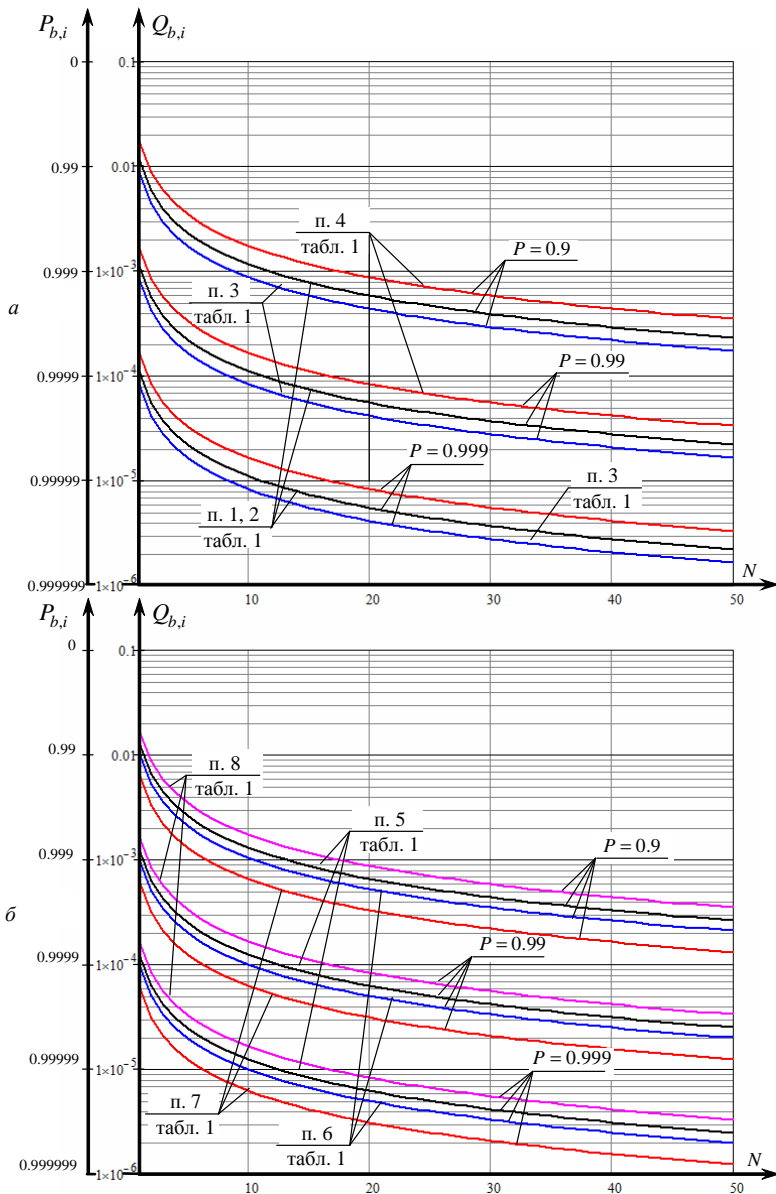


Рис.6 – Нормативна надійність окремих стержнів:
 a – для трикутних башт; b – для чотирикутних башт.

1.Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – 2-е изд., доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.

2.Махінько А.В. Надійність елементів металоконструкцій під дією випадкових змінних навантажень: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 24 с.

3.Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. – К. КГТУСА, 1994. – 32 с.

4.Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 216 с.

5.Пичугин С.Ф., Махінько А.В. Некоторые вопросы расчёта надёжности металлоконструкций // Металлические конструкции. Вып.3. Т.11.– Макеевка: ДонГАСА, 2006. – С.187-196.

6.Пичугин С.Ф., Махінько А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. – Полтава, 2005. – 342 с.

7.Пичугин С.Ф., Махінько А.В. К вероятностным методам расчёта металлоконструкций // Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сб. науч. тр. – Одесса: ОГАСА, 2005. – С.161-171.

8.Пічугін С.Ф., Махінько А.В. Оцінка надійності металоконструкцій при дії випадкових навантажень // 36. доповідей VIII Української наук.-техн. конф. Ч.2. – К.: Сталь, 2004. – С.175-185.

9.Селезнёва Е.Н. Надежность антенно-мачтовых сооружений // Материалы по металлическим конструкциям. Вып.15. – М.: Стройиздат, 1970. – С.67-91.

Отримано 26.01.2009

УДК 69.059.7

В.В.САВЙОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, А.В.САВЙОВСЬКИЙ

Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ

Розглядається проблема прогнозування ефективності виконання будівельно-монтажних робіт при реконструкції будівель. Наведена одна з методик оцінки ймовірної ефективності реконструкції на основі аналізу питомої вартості виконання будівельних робіт залежно від терміну експлуатації будівель, після їх реконструкції. Вказані шляхи підвищення ефективності виконання будівельних робіт при реконструкції.

Частка робіт з реконструкції будівель на сучасному стані в порівнянні з новим будівництвом досить висока. Однак, дієвої методики оцінки ефективності інвестиційно-будівельних проектів по реконструкції існуючих будівель у забудовників поки що немає. Це пов'язано з яскраво вираженою специфікою реконструкції і призводить до зменшення обсягів робіт через невпевненість інвесторів щодо доцільності вкладення коштів.

Інвестори на стадії організаційного періоду реконструкції об'єкту хочуть мати дані не тільки про успішність проекту взагалі, його окуп-